

Méthode de détermination des invariants radiométriques adaptée au paysage semi-aride de l'Afrique de l'Ouest

L. SÉGUI

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en
Coopération (ORSTOM), Laboratoire d'Hydrologie,
34032 Montpellier Cedex 1, B.P. 5045, France

et C. PUECH

Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF-ENGREF,
Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5,
France

(Reçue le 26 mai 1995; version révisée le 29 février 1996)

Abstract. The follow-up of changes by multi-temporal spatial remote sensing studies can be carried out by successive classifications or by dynamic study of the radiometric signal. In this last case, a prior stage of radiometric rectification is required. In developing countries, determinist methods of radiometric rectification are not operational due to lack of atmospheric optical properties automatic recorders. Ideally, empirical methods use only data included in the image. They are founded on research of invariant radiometric points. However they are unusable in rural areas of these countries as the usual invariant radiometric points (asphalt road, roof, etc.) are missing. A new approach, an automatic selection of invariant pixels, is proposed in this paper. This is carried out in two stages: firstly, the bare soils are selected by use of a vegetation index, secondly, an index of brightness is used to distinguish the areas of extreme brightness and darkness in the selected areas. On a site of central Senegal, the quality of the algorithm is assessed by an identification of the sets of invariant pixels using high resolution aerial photography and *in-situ* observations. Dark pixels arise mainly on lateritics and uncultivated lands. Bright pixels are divided between the sandy trails and the crusted surfaces of some fields. Potential applications of multi-temporal spatial data with high resolution are suggested in terms of multi-annual vegetation studies.

Résumé. Le suivi des changements par étude multi-date d'images de télédétection peut se faire par classification successive ou par étude dynamique du signal radiométrique. Dans ce dernier cas, une étape préalable de correction radiométrique s'impose. Dans les pays en voie de développement, les méthodes déterministes de correction radiométrique ne sont pas opérationnelles faute de station d'acquisition des propriétés optiques de l'atmosphère. Ne nécessitant pas de données exogènes aux images, les méthodes empiriques fondées sur la recherche d'invariants radiométriques sont également difficiles d'emploi dans les zones rurales de ces pays car les invariants classiques (route goudronnée, toit, etc.) sont absents. Nous présentons ici une méthode de sélection automatique des invariants. Elle consiste en un double seuillage: le premier, au moyen d'un indice de végétation, sélectionne les zones de sol nu, le second, à l'aide d'un indice de brillance, distingue les *extrema* sombres et clairs de la droite des sols nus. Dans notre application, sur un site du centre du Sénégal, l'identification physique des pixels déterminés invariants par sélection automatique est vérifiée par interprétation de photographies aériennes à haute résolution et par vérité terrain. Les invariants



sombres se situent principalement sur les surfaces latéritiques et incultes, les invariants clairs se partagent entre les chemins sableux ou les surfaces encroûtées de certains champs. L'utilisation de données satellitaires multi-dates à haute résolution spatiale, ouvre le champ du suivi interannuel de la végétation.

1. Introduction

Les capteurs embarqués sur les satellites actuels mesurent des luminances émergeant au sommet de l'atmosphère. D'un jour à l'autre, les conditions atmosphériques évoluent. Il s'ensuit que la réflectance exo-atmosphérique d'une surface, pourtant radiométriquement invariante, n'est pas constante. Pour mémoire, nous rappellerons que l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement est de deux ordres (Girard et Girard 1989):

- (i) l'absorption par certains gaz (O_3 , H_2O , CO_2) ou par les aérosols; les photons absorbés contribuent à réchauffer l'atmosphère qui réémet ensuite cette énergie dans l'infrarouge; l'absorption dépend de la longueur d'onde; pour diminuer ce phénomène, les bandes spectrales d'observation sont choisies à l'extérieur des raies d'absorption les plus intenses;
- (ii) la diffusion; dans ce cas, l'interaction du photon avec un aérosol ou une molécule gazeuse est élastique; la longueur d'onde est conservée mais la trajectoire est modifiée.

L'autre source de modification de la luminance exo-atmosphérique provient des conditions d'éclairement de la cible et de la géométrie du système soleil-cible-satellite.

En fonction du phénomène à caractériser par l'étude multi-date menée, ces modifications de la luminance sont à prendre en compte ou non:

- (i) si les changements étudiés sur les images sont importants (expansion d'une ville, déforestation, incendie), les images peuvent être traitées séparément, par classification dirigée et comparaison, ensuite, des différentes classes;
- (ii) si le changement est lent (régénération forestière, évolution des cultures pendant la saison des pluies en zone tropicale), il est difficile de définir des classes aux limites radiométriques nettes et à la signification précise; les changements sont déterminés par l'évolution d'un indice radiométrique d'une image à l'autre; dans ce cas, une étape préalable à l'étude multi-date consiste en la normalisation radiométrique des images.

Les méthodes de correction peuvent se classer en:

- (i) modèle déterministe, où la trajectoire des photons est analysée du sommet de l'atmosphère à la surface terrestre puis au capteur (modèle 5S de Tanré *et al.* 1990);
- (ii) modèle empirique fondé sur la détermination d'invariants radiométriques sur les images étudiées;

Le principal avantage d'un modèle déterministe de transfert radiatif est que la correction ne s'effectue pas par rapport à une image de référence: elle est absolue. En désavantage à l'utilisation d'un tel modèle, on notera que l'évaluation, par le modèle, des coefficients de transmission par les gaz et par les aérosols ainsi que de la réflectance atmosphérique nécessite la connaissance des profils atmosphériques en vapeur d'eau, pression et aérosols. À moins d'importantes expérimentations sur le terrain, ces caractéristiques instantanées sont inconnues. On utilise donc des profils

moyens standards, ce qui n'est pas répréhensible pour la correction des effets de diffusion moléculaire (Rayleigh), laquelle dépend uniquement de la pression atmosphérique, dont la variation relative est négligeable. Par contre, la correction de l'absorption et de la diffusion par la vapeur d'eau et les aérosols est délicate du fait de la grande variabilité temporelle de ces paramètres (Viovy 1990). Pour gagner en opérationalité, certains paramètres des modèles de transfert sont déduits de l'image. Pour certains canaux, de nombreux auteurs (Hill et Sturm 1988, Chavez 1989, Lavreau 1991, Gilabert *et al.* 1994) assimilent la luminance exo-atmosphérique enregistrée sur les zones les plus sombres de l'image à la luminance de l'atmosphère. Ils en déduisent les épaisseurs optiques des aérosols dans toutes les fenêtres spectrales. Ceci n'est envisageable que si les zones sombres ont une extension suffisante pour que la réflectance du pourtour de la zone n'interfère pas dans sa réflectance propre. En conclusion, l'importance des aérosols, leurs variabilités spatiale et temporelle, l'hétérogénéité radiométrique du paysage et la méconnaissance des paramètres optiques rendent délicates l'utilisation de ces modèles de transfert radiatif (Hall *et al.* 1991) et tout particulièrement dans les pays semi-arides en voie de développement.

Dans les modèles empiriques, la correction est globale, sans distinction des influences respectives de la composition atmosphérique et de la géométrie du système soleil-cible-capteur. Les modèles empiriques se fondent sur la détermination d'invariants radiométriques entre l'image à corriger et une image prise comme référence, puis l'établissement, bande par bande, de relations (linéaires) de transformation des comptes numériques d'une image à l'autre. Le point délicat de la procédure réside dans la reconnaissance des invariants radiométriques. En milieu urbanisé, il est facile de supposer invariants les surfaces goudronnées, les toits d'entrepôt, ou les surfaces gazonnées à évapotranspiration potentielle toujours satisfaite des terrains de golf (Schott *et al.* 1988, Caselles et Lopez Garcia 1989, Hall *et al.* 1991). Par contre, ces structures artificielles sont quasiment absentes des paysages agricoles des pays en voie de développement. Dans cet article, nous proposons une méthode originale d'extraction des objets invariants radiométriquement, appliquée sur une série d'images HRV de SPOT du bassin arachidier sénégalais. Cette méthode est généralisable à toute région rurale à agriculture traditionnelle des pays semi-arides en voie de développement.

2. Présentation de la zone d'étude et des images utilisées

Dans son ensemble, le Sénégal, présente un climat à une saison des pluies unique centrée sur le mois d'août et d'une durée de 1 à 4 mois selon des latitudes croissantes. Notre zone d'intérêt, située au sud du bassin arachidier (14°01' N–15°34' W), reçoit 750 mm de pluie annuellement (moyenne interannuelle: 1950–1985). Les cultures de mil et d'arachide en rotation annuelle occupent 75 pour cent du paysage. Les surfaces restantes sont principalement les affleurements cuirassés des bordures ou des sommets de plateau et les fonds de vallées inondés durant la période de culture.

Sept images multi-bandes (HRV de SPOT, KJ 24–322) (annexe 1) ont été rassemblées sur la période 1987–1988. Sur la figure 1, nous avons reporté conjointement les dates de prises de vues et le cumul des précipitations journalières au poste de référence de la zone. En 1987, les trois images prises sont réparties du début à la fin de la saison des pluies. En 1988, les quatre images devraient permettre de suivre le cycle végétatif d'une saison sèche à l'autre.

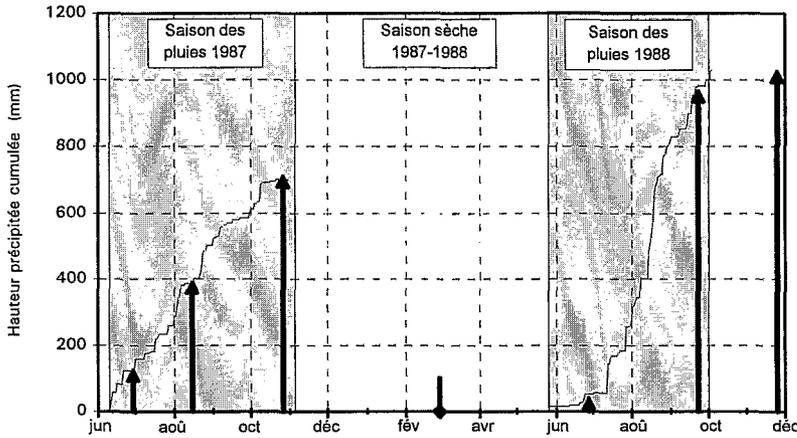


Figure 1. Date de prise de vue et hauteur précipitée cumulée.

Les altérations sur les images sont mineures. Ce sont:

- (i) des différences d'environ un compte numérique entre les parties ouest et est de l'image dans le sens de défilement du satellite; surtout décelables sur le canal XS1 de l'image de Février 1988, elles ont été corrigées;
- (ii) Sur certaines lignes, des pixels présentant des comptes numériques aberrants, souvent trop élevés; ils ont été retirés des traitements ultérieurs par masquage.

À ces défauts techniques, dûs à des déficiences des capteurs ou de la transmission des données, il faut ajouter la présence de nuages et de leur ombre sur les images de juin 1987 et de septembre 1988. Ces zones ont été exclues par masquage lors des traitements radiométriques.

3. Corrections géométriques

Pour comparer et pour suivre la radiométrie de sites particuliers d'une image à l'autre, il est nécessaire de ramener toutes les images dans un même référentiel spatial. Le système retenu est le système UTM (*Universal Transverse Mercator*, Sénégal: fuseau 28). Les coordonnées géographiques d'amers facilement identifiables sur les images ont été repérées sur des orthophotoplans au 1:25 000. Une transformation polynomiale du premier ordre est suffisante pour passer du système de coordonnées ligne-colonne de l'image au système de coordonnées UTM.

Une erreur-type standard est calculée. Pour les zones semi-arides à végétation éparse, elle doit être comprise entre 0.5 et un pixel pour que la correction géométrique soit acceptable (Townshend *et al.* 1992). En moyenne, huit amers ont été utilisés. Les erreurs-types standards sont de l'ordre de 0.65 pixel. Cette erreur est suffisamment faible pour permettre d'assurer, qu'après la correction géométrique, les pixels avec les mêmes coordonnées correspondront bien au même site, d'une image à l'autre.

4. Correction atmosphérique empirique fondée sur les invariants radiométriques

4.1. Principe

Lorsque les profils atmosphériques d'une série d'images d'un même site sont inconnus, une comparaison multi-date est cependant possible en corrigeant radiométriquement les images par rapport à une image de référence. Les corrections radiométriques effectuées rapportent les images aux conditions de prise de l'image de

référence soit même éclaircissement, même angle de visée, même état des capteurs et même caractéristiques atmosphériques.

Rapporter radiométriquement une scène à une scène de référence consiste à :

- (i) définir des objets invariants radiométriquement, communs aux deux scènes; pour ces entités, les différences des comptes numériques d'une image à l'autre sont dues aux changements de conditions atmosphériques et de géométrie du système;
- (ii) puis à calculer, à l'aide des invariants radiométriques, les transformations mathématiques des comptes numériques de l'image à corriger aux comptes numériques de l'image de référence. Caselles et Lopez Garcia (1989) ainsi que Abednego (1989) ont justifié théoriquement la linéarité de ces transformations. Pour établir la correction, il suffit de reconnaître sur les images au moins deux ensembles de pixels radiométriquement invariants et distincts.

Deux critères prévalent dans la sélection de l'image de référence:

- (1) une dynamique étendue sur chacun des canaux;
- (2) l'éventuelle disponibilité des caractéristiques atmosphériques afin de transformer ultérieurement les réflectances apparentes en réflectances au sol par un modèle de transfert radiatif.

Les points invariants doivent avoir des radiométries contrastées. Les meilleurs points sont principalement les zones dégagées de végétation, car les zones de végétation radiométriquement constante sont rares, mis à part les terrains de golf. Les invariants de teinte sombre peuvent être des affleurements rocheux, des surfaces goudronnées (stationnement, autoroute (Caselles et Lopez Garcia 1989)). Les invariants de teinte claire regroupent les étendues sableuses comme terrain de football ou dunes ainsi que les surfaces cimentées (Maracci et Aifadopoulo 1990). Du fait de la variabilité de la turbidité, du développement chlorophyllien et de la réflexion spéculaire, l'eau, sauf la mer au large, n'est pas utilisée comme invariant.

Dans de nombreuses régions du monde, de telles entités n'existent pas. En zone tropicale sèche et tout particulièrement dans notre zone d'étude, l'importante occupation du sol par les cultures ainsi que la petite taille des parcelles rendent difficile et laborieuse la détermination visuelle de zones de sols nus. En conséquence, la méthode de sélection des deux groupes de pixels invariants (clairs et sombres) doit être la plus automatique possible. Pour cela, sur l'image de référence et l'image à corriger, on détermine un groupe de pixels dit 'en commun' (aux mêmes coordonnées géographiques) assimilables à des sols nus en raison de leur indice de végétation faible. Les comptes numériques des pixels de ce groupe sont variés. Parmi ces pixels, on cherche à isoler un sous-groupe où les pixels restent sombres d'une image à l'autre. Pour cela, un indice de brillance est calculé en parallèle sur chacune des images. Au moyen de cet indice, les pixels 'sol nu' les plus sombres sont isolés sur chaque image. Par superposition de l'image de référence à l'image à corriger, on déduit l'ensemble des pixels assimilables à des sols nus, sombres sur les deux images. Cet ensemble de pixel est appelé 'sol nu sombre en commun'. En agissant de manière identique, on détermine les 'sols nus clairs en commun'. La procédure à suivre est détaillée sur la figure 2.

4.2. Mise en oeuvre de la méthode

La végétation étant dans la plus grande partie de l'année peu couvrante au Sahel, l'indice de végétation sélectionné doit être peu sensible à l'influence du sol sur le

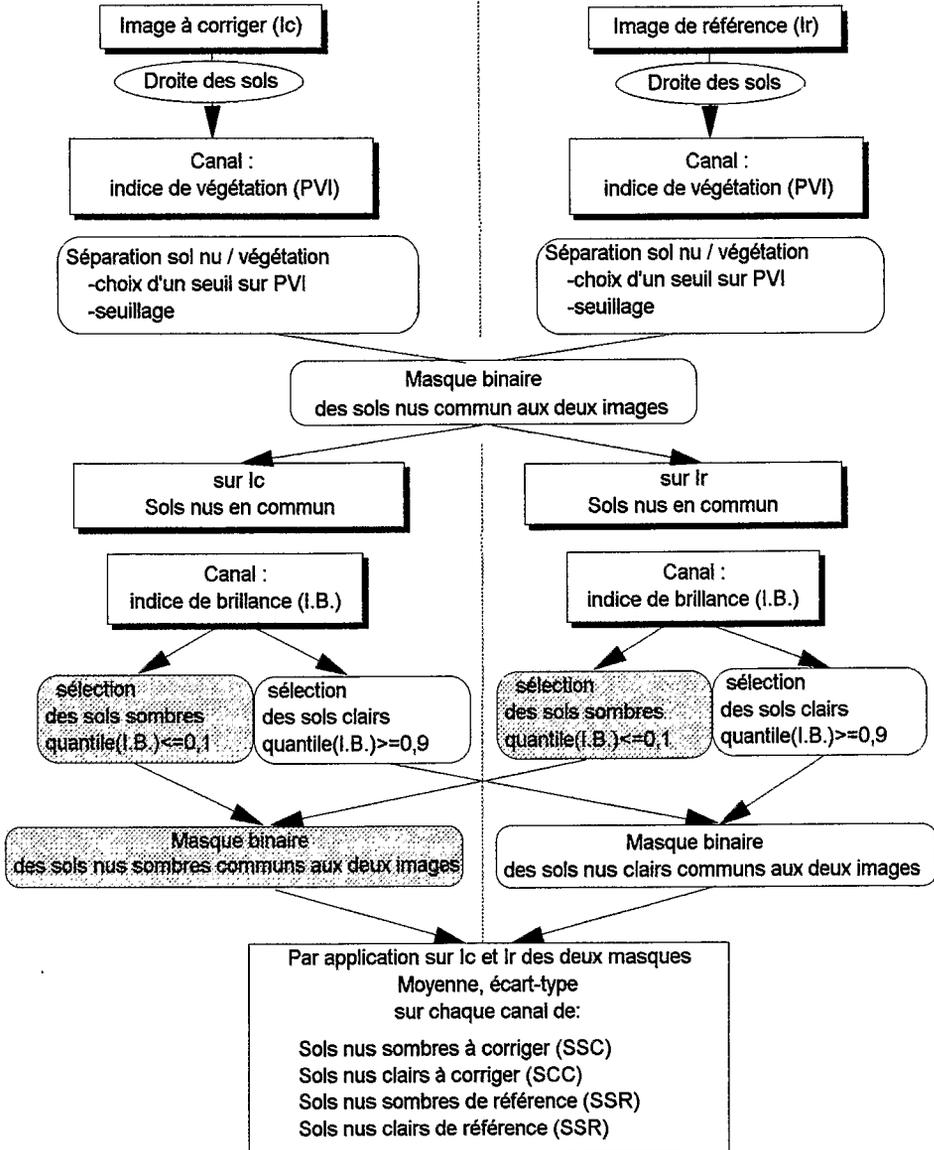


Figure 2. Organigramme de sélection des invariants radiométriques.

signal propre de la végétation. Parmi les nombreux indices de ce type (Baret et Guyot 1991), nous avons retenu le PVI (Perpendicular Vegetation Index), (Richardson et Wiegand 1977) car d'après des mesures radiométriques de terrain (Séguis *et al.* 1994), il a une dynamique importante et sa valeur est voisine de zéro sur les sols nus. L'indice perpendiculaire de végétation est égal à la distance du point considéré dans le plan rouge-proche infrarouge à la droite des sols nus:

$$PVI = \frac{(PIR - \alpha \times R - \beta)}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} \quad (1)$$

quand α, β est pente et ordonnée à l'origine de la droite des sols et R, PIR est coordonnées du pixel dans le plan rouge-proche infrarouge.

Par définition, les lignes d'iso-végétation sont parallèles à la droite des sols. Des essais culturaux sur une gamme de sols de teinte sombre à claire ont en fait montré que les lignes d'iso-végétation, d'abord parallèles à la droite des sols, ont ensuite des pentes croissantes lorsque la biomasse est active et importante (Huete 1988). Comme nous ne cherchons qu'à isoler les pixels de sol nu, ce comportement n'est pas à prendre en compte. La droite des sols nus doit se comprendre comme un domaine de sols nus sensibles à différents paramètres (humidité, clarté, rugosité, etc.). La droite représente en fait la tendance moyenne du domaine. Parmi les pixels des limites de ce domaine, il y a des pixels qui sont véritablement des sols nus et d'autres qui possèdent une faible couverture végétale. Pour réduire l'influence de ces derniers pixels, l'équation de la droite des sols nus a été calculée sur les classes de plus faibles indices de végétation normalisés, obtenue par une classification non dirigée sur l'image.

Sur la figure 3, après classification, les groupes issus de la classification sont reportés sur des graphes rouge, proche infrarouge (canaux XS2, XS3 de HRV de SPOT) ainsi que les droites de sols. Le tableau 1 regroupe la pente et l'ordonnée à l'origine de ces droites.

L'observation rapide de ces graphes permet de séparer le lot des sept images en deux ensembles:

- (i) le premier caractérisé par des radiométries importantes en XS3 (août 1987, octobre 1987, septembre 1988); certains points très éloignés de la droite des sols sont l'expression d'une végétation active;

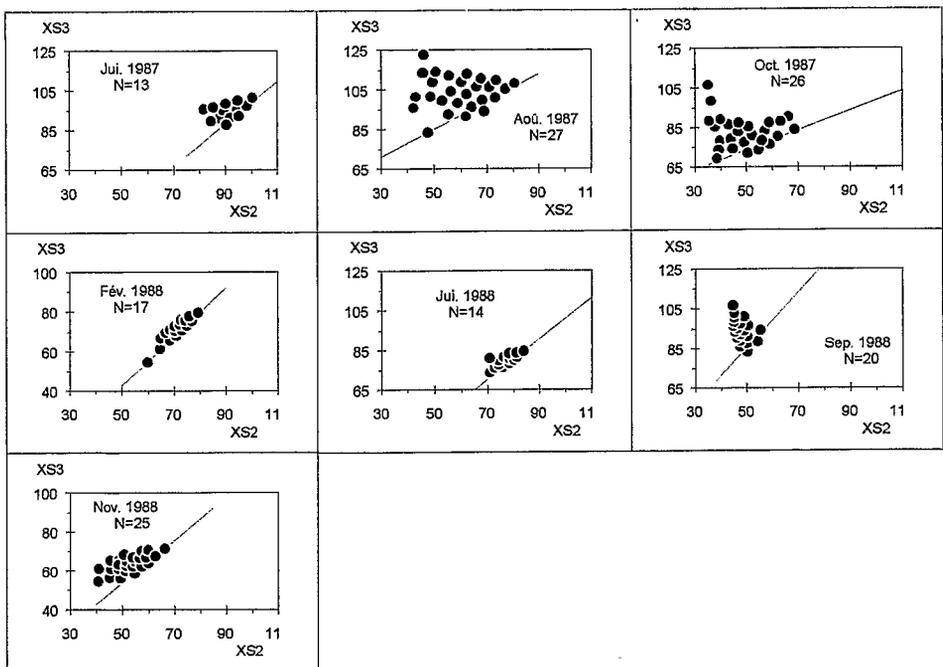


Figure 3. Images classées et droite des sols dans le plan rouge (XS2)—proche infrarouge (XS3) (classification non dirigée).

Tableau 1. Pente (α) et ordonnée à l'origine (β) des droites des sols des sept images ($XS3 = \alpha XS2 + \beta$).

| Image | α | β |
|--------------|----------|---------|
| 29 jun 1987 | 1.07 | -8.20 |
| 15 août 1987 | 0.71 | 49.65 |
| 27 oct 1987 | 0.50 | 48.69 |
| 28 fév 1988 | 1.24 | -19.44 |
| 27 jun 1988 | 1.02 | -1.09 |
| 23 sep 1988 | 1.39 | 15.86 |
| 25 nov 1988 | 1.10 | -1.34 |

- (ii) le second, où la radiométrie des groupes de pixels déterminés par classification est très proche de la droite des sols; ce sont les images de saison sèche ou de début ou de fin d'hivernage (juin 1987, février 1988, juin 1988, novembre 1988). La forte dispersion des points en février 1988 vers le bas de la droite des sols est due à la présence de brûlis.

L'image du mois d'août 1987 est prise comme image de référence en raison de sa dynamique étendue.

L'indice de brillance retenu (IB) est égal à la distance du pixel à l'origine ($\sqrt{PIR^2 + R^2}$). L'histogramme des IB calculés pour les pixels de PVI faible permet de séparer les sols nus les plus sombres (fréquence au non dépassement égale à 0.1) et les plus clairs (fréquence au dépassement égale à 0.1). Leur statistique dans les trois canaux est regroupée à l'annexe 2.

4.3. Identification physique des invariants

Sur les 351 645 pixels de chaque image, environ 60-170 ont été sélectionnés invariants pour chaque image à corriger. Une première vérification de la qualité de l'algorithme de sélection des invariants passe par l'identification de la nature physique des invariants. Cette identification a été réalisée par superposition de l'image des invariants sur des orthophotoplans disponibles à l'échelle du 1:25 000 (O.M.V.G. 1983) et aussi par une visite sur le terrain. La zone d'étude présente des plateaux plus ou moins cuirassés à leur périphérie et bordés par des talus puis des glacis d'épandage. Des terrasses récentes ou actuelles raccordent ces unités au réseau hydrographique de base (Bertrand 1972). Les sols de plateaux sont sombres tandis que les sols des glacis d'épandage et des terrasses sont beiges clairs.

Un premier groupe d'invariants est constitué de surfaces incultes car encroûtées ou régosoliques:

- (i) les invariants clairs sont des termitières mortes arasées, des croûtes superficielles d'érosion (Casenave et Valentin 1989, Valentin 1990) au bas des talus et dans les zones de concentration du ruissellement sur les glacis;
- (ii) les invariants sombres sont les surfaces gravillonnaires ou cuirassées en bordure des plateaux.

Le second groupe d'invariants le plus important se localise sur des sols non encroûtés, cultivables:

- (i) les invariants sombres se situent majoritairement au centre des plateaux, dans des champs probablement semés tardivement (ce qui explique des

indices de végétation très faibles pour ces points en Août 1987, date de l'image de référence) et sur les vertisols des bas-fonds mis en culture (maraîchage) en fin d'hivernage;

- (ii) les invariants clairs sont situés dans des champs non cultivés des glacis et des terrasses.

Enfin, des invariants clairs sont identifiables à des tronçons de chemin et à des carrefours. Certains quartiers denses de village aux cases recouvertes de chaume de mil ancien et noir forment des groupes d'invariants sombres. Sur le tableau 2, nous présentons la répartition des différents thèmes.

Sur les sites les plus caractéristiques des principaux thèmes identifiés, nous avons effectué des mesures de réflectance au moyen d'un radiomètre de terrain (CIMEL CE310; Guyot *et al.* 1984). Pour des raisons pratiques, la réflectance des toits de chaume n'a pas pu être mesurée. Sur la figure 4, nous avons reporté les réflectances des différents invariants avec d'autres mesures de réflectance effectuées sur le terrain en fin de la saison sèche 1992-1993 (absence de végétation) sur un transect d'une toposéquence sur glacis. Sur ce transect, la réflectance était mesurée tous les 25 m.

Tableau 2. Répartition (%) des objets invariants sombres et clairs dans les différents thèmes invariants identifiés.

| Thème | Sombre | Clair |
|----------------------------------|--------|-------|
| Termitière, croûte d'érosion | 0 | 8 |
| Croûte d'érosion de bas de talus | 0 | 10 |
| Gravillons, cuirasse | 13 | 0 |
| Champ de plateau | 0 | 20 |
| Champ de glacis et terrasse | 15 | 0 |
| Village | 5 | 0 |
| Chemin | 0 | 14 |
| Bas-fond | 5 | 0 |
| Non identifié | 10 | |

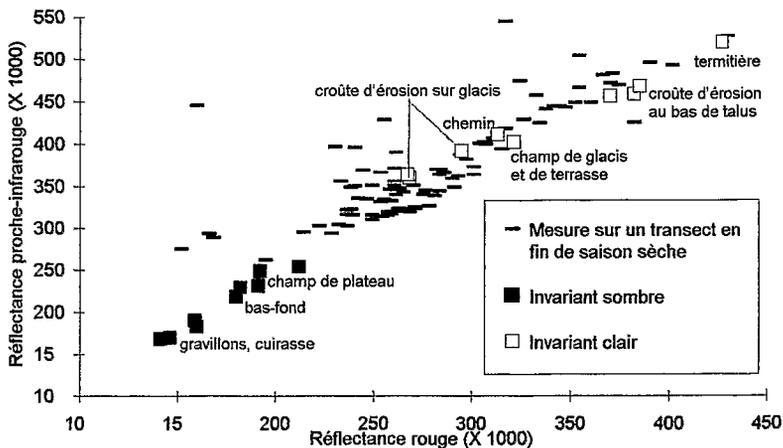


Figure 4. Réflectance mesurée sur le terrain des principaux thèmes d'invariants et réflectance au long d'un transect (un point tous les 25 m) sur glacis à la fin de la saison sèche 1992-1993.

Ces mesures étaient destinées à l'établissement de l'équation de la droite des sols nus (Séguis *et al.* 1994). Sur la figure 4, nous montrons, d'une part, la bonne ségrégation des invariants sombres et clairs, et d'autre part, les sols sur glaciés étant de dominance clair, nous vérifions que les points du transect de forts indices de brillance se superposent aux invariants clairs.

4.4. Transformation des images à corriger et résultats

À la section précédente, les pixels de sol nu clair et sombre ont été identifiés sur l'image de référence et sur l'image à corriger. Pour chacune des bandes spectrales, la transformation à appliquer est linéaire de forme:

$$Xt = A * X + B \quad (2)$$

où X est le compte numérique de l'image à corriger et Xt est le compte numérique après correction.

Dans cette équation, A et B sont des coefficients déterminés selon les formules suivantes:

$$A = (SCR - SSR)/(SCC - SSC) \quad (3)$$

$$B = (SSR * SCC - SCR * SSC)/(SCC - SSC) \quad (4)$$

où SSR est la moyenne radiométrique des pixels de sol sombre de l'image de référence, SCR est la moyenne radiométrique des pixels de sol clair de l'image de référence, SSC est la moyenne radiométrique des pixels de sol sombre de l'image à corriger, et SCC est la moyenne radiométrique des pixels de sol clair de l'image à corriger.

A et B sont calculés pour chaque canal de l'image à corriger. Sur le tableau 3, nous donnons les paramètres de transformation des six images.

Sur les figures 5(A) et (B), nous présentons dans le plan rouge/proche-infrarouge, les droites des sols, les points invariants et les courbes-enveloppes des diagrammes bidimensionnels XS2-XS3. Avant correction (5(A)), les droites des sols et les courbes-enveloppes sont dispersées dans tout le plan. À ce stade, les courbes ne sont pas utilisables entre elles et nous ne les utiliserons pas. Au contraire, après correction (5(B)), les courbes-enveloppes s'appuient sur la même droite des sols. La disposition des courbes-enveloppes est cohérente avec le cycle précipitation-végétation.

Tableau 3. Pente (A) et ordonnée à l'origine (B) de la transformation linéaire de correction pour chaque bande et chaque image (équation (2)).

| Image | XS1 | | XS2 | | XS3 | |
|-------------|------|--------|------|--------|------|-------|
| | A | B | A | B | A | B |
| 29 jun 1987 | 2.12 | -114.0 | 2.05 | -122.0 | 1.55 | -46.2 |
| 27 oct 1987 | 0.97 | 11.5 | 1.06 | 9.8 | 1.19 | 5.6 |
| 28 fév 1988 | 1.75 | -44.8 | 1.52 | -45.4 | 0.86 | 34.3 |
| 27 jun 1988 | 1.38 | -41.7 | 1.67 | -66.2 | 1.23 | -2.0 |
| 23 sep 1988 | 2.66 | -88.3 | 2.27 | -58.0 | 1.34 | -21.8 |
| 25 nov 1988 | 1.36 | -6.7 | 1.36 | -17.6 | 1.21 | 14.7 |

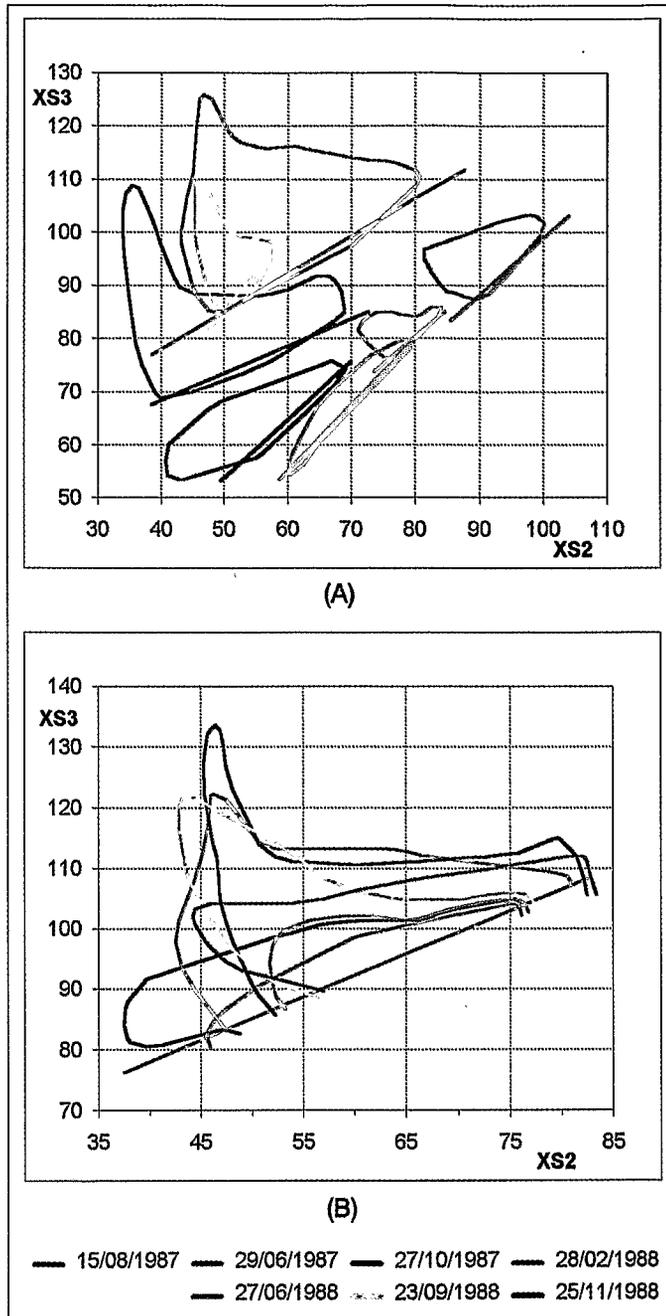


Figure 5. Droites des sols et courbes-enveloppes des classes des images brutes (A) et corrigées (B).

Dans le détail, on observe:

- (i) en début de saison des pluies: une déformation asymétriques des courbes-enveloppes; l'enveloppe croît d'abord dans sa partie basse (29 juin 1987, 27

juin 1988) perpendiculairement à la droite des sols; ceci est conforme aux observations de terrains, soit un développement végétal plus précoce des zones sombres (surfaces caillouteuses ou latéritiques incultes) par rapport aux zones claires (domaine préférentiel des champs sarclés en début de culture);

- (ii) au milieu et en fin de la saison des pluies: un étirement important des courbes-enveloppes perpendiculairement à la droite des sols nus (15 août 1987, 27 octobre 1987 et 23 septembre 1988); en effet, la végétation caractérisée par une réflectance forte dans le proche infrarouge et faible dans le rouge se développe;
- (iii) en saison sèche: un aplatissement des courbes enveloppes le long de la droite des sols (28 février 1988, 25 novembre 1988); la forme de la courbe-enveloppe de l'image du 25 novembre 1988 montre, que deux mois après la fin des pluies (figure 1), la sénescence de la végétation est déjà importante.

4.5. Validations

La précision des paramètres A et B dépend de la précision d'estimation des moyennes radiométriques SSC , SCC , SSR et SCR des groupes de pixels invariants ayant servi à l'ajustement. Hall *et al.* (1991) donnent comme écart-type σXt d'une valeur transformée Xt :

$$\begin{aligned} \sigma Xt^2 = & \{(X - SSC)/(SCC - SSC)\}^2 (\sigma_{scr})^2 / N_{scr} \\ & + \{(SCC - X)/(SCC - SSC)\}^2 (\sigma_{ssr})^2 / N_{ssr} \\ & + \{[SSR - Xt]/[SCC - SSC]\}^2 (\sigma_{scc})^2 / N_{scc} \\ & + \{[Xt - SCR]/[SCC - SSC]\}^2 (\sigma_{ssc})^2 / N_{ssc} \\ & + \{(SCR - SSR)/(SCC - SSC)\}^2 \sigma^2 \end{aligned} \quad (5)$$

où σ_{ssc} , σ_{scc} sont les écart-types des sols nus sombres et clairs de l'image à corriger (N_{ssc} et N_{scc} effectifs respectifs), σ_{ssr} , σ_{scr} sont les écart-types des sols nus sombres et clairs de l'image de référence (N_{ssr} et N_{scr} effectifs respectifs), et σ est l'écart-type de mesure du compte numérique par le capteur (estimé à 1).

Les quatre premiers termes représentent les erreurs d'échantillonnage dans l'image de référence et dans l'image à corriger. Le dernier terme représente l'erreur propre au capteur dans la quantification du signal.

On perçoit que l'erreur d'estimation σXt est plus importante à proximité de chacun des groupes ayant servi à l'ajustement qu'entre eux. Nous l'avons calculé pour chacun des groupes de pixels invariants. Sur le tableau 4 nous regroupons les écart-types d'estimation (S_{scr} et S_{ssr}) pour les points invariants dans les trois canaux.

L'erreur relative est faible, soit de 1 à 3 pour cent. En déduisant l'erreur standard causée par le capteur, laquelle est égale au quatrième terme de l'équation (5), l'erreur due à l'échantillonnage des pixels invariants est toujours inférieure à 1,3 compte numérique. Ce résultat montre la bonne ségrégation des groupes d'invariants tant en ce qui concerne leur moyenne radiométrique que leur dispersion.

La validation des transformations est possible si l'on dispose d'autres points invariants comme, par exemple, les zones de végétation *semper vivens* situées en bordures des marigots. D'une image à l'autre, ces zones ont une forte réponse dans l'infrarouge. Sur le tableau 5, nous donnons les moyennes radiométriques de ces

Tableau 4. Écart-type d'estimation et erreur relative des invariants sols clairs et sombres après correction, pour chaque bande.

| | XS1 | | | | XS2 | | | | XS3 | | | |
|-------------|------------------------|-----|------------------------|-----|------------------------|-----|------------------------|-----|------------------------|-----|------------------------|-----|
| | $\sigma_{sct}/$ SCR | | $\sigma_{sst}/$ SSR | | $\sigma_{sct}/$ SCR | | $\sigma_{sst}/$ SSR | | $\sigma_{sct}/$ SCR | | $\sigma_{sst}/$ SSR | |
| | σ_{sct} | (%) | σ_{sst} | (%) | σ_{sct} | (%) | σ_{sst} | (%) | σ_{sct} | (%) | σ_{sst} | (%) |
| 29 jun 1987 | 2.37 | 2.9 | 2.21 | 3.3 | 2.33 | 2.9 | 2.10 | 3.5 | 1.75 | 1.7 | 1.58 | 1.8 |
| 27 oct 1987 | 1.45 | 2.3 | 1.10 | 1.7 | 1.76 | 2.3 | 1.23 | 2.2 | 1.58 | 1.6 | 1.27 | 1.5 |
| 28 fév 1988 | 1.89 | 2.3 | 1.78 | 2.7 | 1.68 | 2.1 | 1.57 | 2.7 | 0.96 | 0.9 | 0.91 | 1.0 |
| 27 jun 1988 | 1.47 | 1.8 | 1.40 | 2.2 | 1.71 | 2.2 | 1.70 | 3.0 | 1.27 | 1.3 | 1.26 | 1.5 |
| 23 sep 1988 | 2.80 | 3.6 | 2.75 | 4.2 | 2.53 | 3.3 | 2.40 | 4.1 | 1.44 | 1.4 | 1.46 | 1.7 |
| 25 nov 1988 | 1.46 | 1.8 | 1.47 | 2.2 | 1.59 | 2.0 | 1.47 | 2.5 | 1.36 | 1.3 | 1.32 | 1.5 |

Tableau 5. Radiométrie des bordures de marigots après correction (écart-relatif par rapport à l'image de référence du 15 Août 1987).

| | XS2 | XS3 | Écart-relatif XS2 (%) | Écart-relatif XS3 (%) |
|-------------|-----|-----|--------------------------|--------------------------|
| Référence | 44 | 111 | | |
| 29 jun 1987 | 41 | 106 | -7 | -5 |
| 27 oct 1987 | 48 | 119 | 9 | 7 |
| 28 fév 1988 | 53 | 94 | 20 | -15 |
| 27 jun 1988 | 54 | 95 | 23 | -14 |
| 23 sep 1988 | 51 | 112 | 16 | 1 |
| 25 nov 1988 | 44 | 91 | 0 | -18 |

zones après correction. Les valeurs radiométriques sont sensiblement égales à celles déterminées en août 1987 sur l'image de référence.

L'importance des écarts relatifs ne met pas en doute la méthode mais plutôt l'hypothèse de stabilité radiométrique des pixels de végétation. Par exemple, lorsque la saison des pluies débute (juin 1988), la végétation n'a pas encore repris même en bordure de marigot. La réponse dans le rouge d'une végétation sénescente est supérieure à celle d'une végétation croissante (Girard et Girard 1989). La correction radiométrique ramène le compte numérique XS2 à 54, valeur supérieure de 10 à celle de référence, car la végétation était en phase de croissance à la suite de 400 mm de précipitation.

5. Conclusion et perspectives de classification multidate ouvertes par les corrections radiométriques

Jusqu'à présent, les méthodes empiriques de correction fondées sur des invariants radiométriques n'avaient pas été appliquées à l'extérieur des pays développés ou des zones urbaines. La méthode de sélection automatique des invariants présentée dans cet article a été appliquée aux paysages de savanes fortement cultivées du sud du Sahel, mais elle est généralisable à tout milieu où les invariants radiométriques classiques (route, toit, etc.) font défaut. Le double seuillage sur l'indice de végétation et sur l'indice de brillance par croisement de l'image à corriger et de référence est très restrictif: dans l'exemple présenté, environ un pixel sur 2500 est retenu comme invariant. L'analyse statistique montre que l'erreur dans les formules de transformation due à l'échantillonnage des pixels invariants est faible. Cependant, dans la

sélection des invariants, il est préférable de soustraire les zones inondées et leurs bordures, car, en raison de leur faible réflectance, elles fausseraient la détermination de la droite des sols nus et donc des invariants.

Dès lors, dégagé des contraintes de variabilité des conditions atmosphériques et de géométrie du système satellite-cible-soleil, un suivi multidate précis de phénomènes évoluant lentement est envisageable. Dans notre exemple, des parcelles caractéristiques des différentes unités du paysage ont été déterminées sur chaque image. Les corrections radiométriques faites, on peut suivre l'évolution temporelle de ces parcelles dans le plan XS2-XS3 (extension de la notion de *tasseled Cap Model* de Kauth et Thomas 1976) (figure 6). Cette évolution est dictée par le type de couvert végétal. Globalement, on distingue trois types de comportement: les cultures, les surfaces naturelles faiblement arborées et celles plus densément boisées. Les parcelles de culture ont une brillance plus forte que les parcelles tout au long de l'année et plus particulièrement en saison sèche lorsqu'elles sont dénudées. Les forêts claires et les forêts galeries ont une valeur forte de l'indice de végétation (éloignement par rapport à la droite des sols) et un indice de brillance faible même en saison sèche, car la végétation est sénescente mais les surfaces ne sont pas mises à nues comme dans les parcelles de culture. Enfin, les zones de brousse tachetée et de talus apparaissent comme intermédiaires.

On montre ainsi que l'évolution temporelle représente une signature des principaux thèmes végétaux bien plus performante que la simple étude radiométrique d'une seule image. Des algorithmes de classification existent déjà pour les longues séries temporelles des données AVHRR de NOAA (Viovy 1990, Janodet 1994). Le développement d'algorithmes adaptés à de très petites séries d'images (corrélativement de grande résolution) devrait permettre une cartographie précise nécessitant moins de données terrain. Dans ce cas, le coût relatif des deux approches (une seule image et beaucoup de terrain par rapport à beaucoup d'images et peu de terrain) serait à comparer. Il est envisageable qu'une cartographie par une approche multidate soit plus précise et plus généralisable.

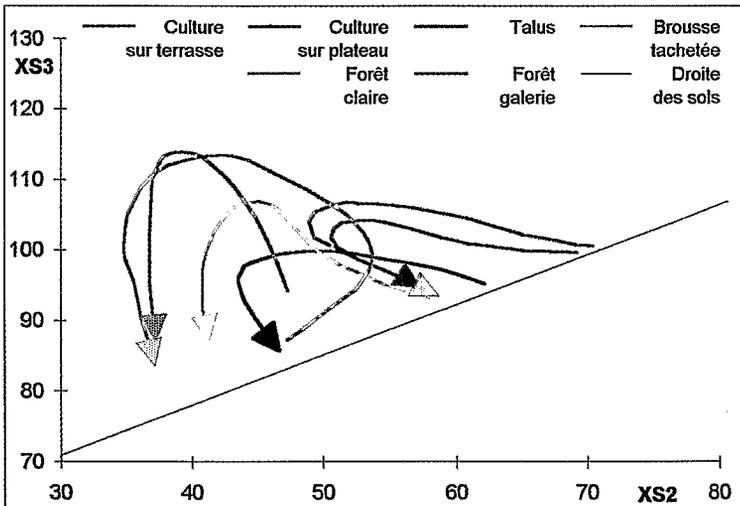


Figure 6. Évolution radiométrique des principaux couverts du 28 février 1988 au 25 novembre 1988.

Au delà de ces conclusions, le suivi de la végétation à l'aide d'un satellite à haute résolution ouvre de prometteuses perspectives, notamment en hydrologie où l'impact de la végétation sur le ruissellement est reconnu. Une application pourrait être le suivi hydrologique d'un bassin versant cultivé avec en parallèle la prise d'images HRV de SPOT à des intervalles de temps de trois semaines à un mois environ. Cette approche permettrait une caractérisation temporelle des conditions d'écoulement, notamment en cernant les dates clés où les modifications de la couverture végétale entraînent un réel changement sur l'écoulement.

Annexe 1. Caractéristiques géométriques des images HRV de SPOT multibandes (angle en degrés).

| KJ | Date/heure | Prise de vue | | Orientation du soleil | |
|--------|-----------------------|--------------|---------------|-----------------------|----------|
| | | azimut (°) | incidence (°) | azimut (°) | site (°) |
| 24-322 | 29 jun 1987 11:45:24 | 9.2 | 10.4 | 60.8 | 69.0 |
| 24-322 | 15 août 1987 11:41:39 | 1.9 | 2.2 | 86.0 | 69.3 |
| 24-322 | 27 oct 1987 11:37:55 | -5.0 | -5.6 | 146.8 | 56.5 |
| 24-322 | 29 fév 1988 11:52:52 | 21.8 | 24.8 | 136.8 | 59.4 |
| 24-322 | 27 jun 1988 11:44:59 | 8.8 | 10.0 | 60.6 | 68.9 |
| 24-322 | 23 sep 1988 11:53:14 | 21.2 | 24.1 | 130.7 | 69.3 |
| 24-322 | 25 nov 1988 11:41:44 | 1.9 | 2.2 | 153.9 | 51.7 |

Annexe 2. Moyenne, écart-type, effectif des sols nus sombres et clairs sur les images à corriger et l'image de référence pour chaque canal.

(a) XSI

| Date | Image à corriger | | | | Image de référence | | | | Effectifs | |
|-------------|------------------|-------|----------------|----------------|--------------------|-------|----------------|----------------|-----------|----------|
| | SSC | SCC | σ_{SSC} | σ_{SCC} | SSR | SCR | σ_{SSR} | σ_{SCR} | N_{SS} | N_{SC} |
| 29 jun 1987 | 85.48 | 92.37 | 1.26 | 1.92 | 67.04 | 81.66 | 1.53 | 3.68 | 25 | 27 |
| 27 oct 1987 | 54.21 | 67.42 | 2.01 | 3.04 | 63.96 | 76.73 | 2.24 | 3.69 | 32 | 19 |
| 28 fév 1988 | 62.58 | 71.57 | 1.28 | 2.18 | 64.86 | 80.62 | 1.51 | 3.68 | 92 | 56 |
| 27 jun 1988 | 76.97 | 88.60 | 1.65 | 2.04 | 64.46 | 80.51 | 1.52 | 2.80 | 113 | 64 |
| 23 sep 1988 | 58.05 | 62.77 | 2.24 | 2.45 | 66.12 | 78.68 | 1.74 | 3.18 | 79 | 72 |
| 25 nov 1988 | 53.88 | 64.42 | 2.02 | 2.26 | 66.35 | 80.64 | 1.96 | 2.49 | 34 | 54 |

(b) XS2

| Date | Image à corriger | | | | Image de référence | | | | Effectifs | |
|-------------|------------------|-------|----------------|----------------|--------------------|-------|----------------|----------------|-----------|----------|
| | SSC | SCC | σ_{SSC} | σ_{SCC} | SSR | SCR | σ_{SSR} | σ_{SCR} | N_{SS} | N_{SC} |
| 29 jun 1987 | 89.12 | 98.62 | 0.76 | 1.70 | 59.80 | 79.25 | 1.85 | 4.66 | 25 | 27 |
| 27 oct 1987 | 43.37 | 62.63 | 2.13 | 4.72 | 55.75 | 76.15 | 2.68 | 3.57 | 32 | 19 |
| 28 fév 1988 | 67.72 | 81.50 | 2.21 | 1.95 | 57.54 | 78.55 | 1.46 | 4.27 | 92 | 56 |
| 27 jun 1988 | 73.77 | 85.65 | 1.61 | 1.14 | 57.00 | 76.82 | 1.89 | 2.45 | 113 | 64 |
| 23 sep 1988 | 51.06 | 59.54 | 2.89 | 3.75 | 57.93 | 77.19 | 2.12 | 4.06 | 79 | 72 |
| 25 nov 1988 | 55.79 | 70.42 | 1.54 | 3.20 | 58.26 | 78.20 | 2.5 | 4.14 | 34 | 54 |

Annexe 2. (suite)

(c) XS3

| Date | Image à corriger | | | | Image de référence | | | | Effectifs | |
|-------------|------------------|-------|----------------|----------------|--------------------|--------|----------------|----------------|-----------|----------|
| | SSC | SCC | σ_{SSC} | σ_{SCC} | SSR | SCR | σ_{SSR} | σ_{SCR} | N_{SS} | N_{SC} |
| 29 jun 1987 | 87.75 | 97.00 | 0.58 | 1.86 | 89.94 | 104.13 | 1.56 | 3.25 | 25 | 27 |
| 27 oct 1987 | 68.50 | 78.84 | 1.45 | 3.06 | 87.53 | 99.89 | 1.65 | 2.61 | 32 | 19 |
| 28 fév 1988 | 64.18 | 80.28 | 3.01 | 1.48 | 89.46 | 103.25 | 1.35 | 2.89 | 92 | 56 |
| 27 jun 1988 | 73.73 | 85.18 | 2.01 | 1.08 | 88.72 | 102.81 | 1.53 | 1.95 | 113 | 64 |
| 23 sep 1988 | 81.53 | 92.88 | 3.34 | 2.50 | 87.45 | 102.69 | 2.38 | 2.90 | 79 | 72 |
| 25 nov 1988 | 60.64 | 73.53 | 2.01 | 3.27 | 88.08 | 103.64 | 1.88 | 2.27 | 34 | 54 |

Bibliographie

- ABEDNEGO, B. S. P., 1989, Apports de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse), 220 pp (plus annexes).
- BARET, F., et GUYOT, G., 1991, Potentials in limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, **35**, 161–173.
- BERTRAND, R., 1972, Morphopédologie et orientations culturelles des régions soudaniennes du Siné Saloum (Sénégal). *L'Agronomie Tropicale*, **27**, 1115–1190.
- CASELLES, V., et LOPEZ GARCIA, M. J., 1989, An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multi-temporal studies. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, 1127–1134.
- CASENAVE, A., et VALENTIN, C., 1989, Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. Collection Didactiques, ORSTOM, Paris, 229 pp.
- CHAVEZ, P. S., 1989, Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multi-spectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**, 1285–1294.
- GILABERT, M. A., CONESE, C., et MASELLI, F., 1994, An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, 2065–2086.
- GIRARD, M. C., et GIRARD, C. M., 1989, *Télédétection appliquée: zones tempérées et tropicales* (Paris: Masson), 260 pp.
- GUYOT, G., HANOCK, J. F., BUIS, J. P., et SAINT, G., 1984, Mise au point d'un radiomètre de simulation de SPOT. In *Signatures spectrales d'objets en Télédétection, Bordeaux, France, septembre 1983* (Paris: INRA), pp. 233–242.
- HALL, F. G., STREBEL, D. E., NICKESON, J. E., et GOETZ, S., 1991, Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multi-date, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, **35**, 11–27.
- HILL, J., et STURM, B., 1988, Image-based atmospheric correction of multi-temporal thematic mapper data for agricultural land cover classification. *Proceedings of IGARSS'88 Symposium held in Edinburgh (Scotland), 13–16 september 1988*, SP-284 (Paris: European Space Agency), pp. 895–899.
- HUETE, A. R., 1988, A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, **25**, 295–309.
- JANODET, E., 1994, Cartographie fonctionnelle d'écosystèmes tropicaux africains à partir de l'évolution temporelle de leurs réponses radiométriques. Thèse de doctorat, Université de Paris XI Orsay, 149 pp. (plus annexes).
- KAUTH, R. J. et THOMAS, G. S., 1976, The tasselled-cap—A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remote Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, June 1976*, pp. 4b41–4b51.
- LAVREAU, J., 1991, De-hazing Landsat Thematic Mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **57**, 1297–1302.

- MARACCI, G. et AIFADOPOULO, D., 1990, Multi-temporal remote sensing study of spectral signatures of crops in the Thessaloniki test site. *International Journal of Remote Sensing*, **11**, 1609–1615.
- O.M.V.G., 1983. Bassin du fleuve Gambie, orthophotoplans au 1:25 000 avec une équidistance de 5 m. Organisation de mise en valeur du fleuve Gambie, Dakar, Sénégal.
- RICHARDSON, A. J. et WIEGAND, C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **43**, 1541–1552.
- SCHOTT, J. R., SALVAGGIO, C., et VOLCHOK, W. J., 1988, Radiometric normalization using pseudo-invariant features. *Remote Sensing of Environment*, **26**, 1–16.
- SÉGUI, L., BOSCHER, C., et ALBERGEL, J., 1994, Discrimination de différentes couvertures végétales par radiométrie de terrain en savane soudano-sahélienne. *X^e Journées Hydrologiques, Montpellier, septembre 1994* (Montpellier: ORSTOM), pp. 533–541.
- TANRÉ, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., PERBOS, J., et DESCHAMPS, P. Y., 1990, Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, **11**, 659–668.
- TOWNSHEND, J. R., JUSTICE, G., GURNEY, C., MCMANUS, J., 1992. The impact of misregistration on change detection. *I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **30**, 1054–1060.
- VALENTIN, C., 1990. Les états de surface des bassins versants de Thyse Kaymor (Sénégal). ORSTOM, ISRA, IRAT, Dakar, 10 pp (plus annexes).
- VIOVY, N., 1990, Etude spatiale de la biosphère terrestre: Intégration de modèles écologiques et de mesures de télédétection. Thèse de doctorat, Laboratoire d'Études et de Recherches en Télédétection Spatiale, Toulouse, France, 212 pp.